



Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Untersuchen von Objekten. Insbesondere betrifft die Erfindung eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Untersuchung von an Objekten mit diffus streuender Oberfläche auftretenden Verformungen.

Nicht zerstörende Objektprüfungen sind insbesondere dort praktisch interessant, wo Qualitätsprüfungen an Werkstücken oder anderweitigen Arbeitsobjekten vorzunehmen sind. Beispielsweise stellt sich in der Praxis die Aufgabe, Reifen auf Fehlstellen zu untersuchen.

Dazu ist es aus der DE 42 31 578 C2 bekannt, die Oberfläche eines Prüflings mit Laserdioden zu beleuchten. Die Beobachtung des Prüflings erfolgt mittels eines Interferometers, das an einem Bildsensordsystem ein Interferenzbild erzeugt. Ein Spiegel des Interferometers ist beweglich angeordnet. Die erzeugten Interferenzbilder sind  $2\pi$ -moduliert; dies bedeutet, dass Phasendrehungen, die den Wert  $2\pi$  überschreiten, von einer entsprechenden, um  $2\pi$  verminderten Phasendrehung nicht ohne weiteres unterscheidbar sind. Dadurch kann ein Punkt- oder Linienmuster erzeugt werden, das die Verformung der Oberfläche kennzeichnet.

Zur Beleuchtung der Objektoberfläche werden mehrere Laserdioden eingesetzt, die jeweils einen Leuchtfleck erzeugen. Die Leuchtflecke grenzen aneinander und überlappen sich allenfalls in Randzonen. Die beleuchteten Teilflächen setzen die Gesamtfläche zusammen. Die Abbildungsqualität der Einrichtung ist eingeschränkt.

Davon ausgehend ist es Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Beobachten von Objektoberflächen zu schaffen, die bzw. das eine verbesserte Bildqualität aufweist.

Diese Aufgabe wird mit der Vorrichtung nach Anspruch 1 und dem Verfahren nach Anspruch 18 gelöst.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist einen Messkopf auf, der anhand des von der Objektoberfläche rückgestreuten Lichts ein Interferenzbild erzeugt. Ein elektronischer Bildsensor, der in den Messkopf integriert sein kann, erfasst das Interferenzbild und wandelt es in entsprechende elektrische Signale um, die dann weiter auswertbar sind.

Das von dem Messkopf erfasste Bildfeld wird von einer Beleuchtungseinheit beleuchtet, die mehrere Laserdioden aufweist. Diese sind so angeordnet, dass sie einen gemeinsamen Leuchtfleck bilden. Dieser ist vorzugsweise gleichmäßig ausgeleuchtet, so dass innerhalb des Leuchtflecks nur geringe Helligkeitsunterschiede anzutreffen sind. Dies wird durch eine relativ große Überlappung der aus den einzelnen Laserdioden austretenden Lichtbündel erreicht. Der gemeinsame Leuchtfleck ist nicht in Einzeleleuchtflecke unterteilt.

Durch die gleichmäßige Ausleuchtung der zu untersuchenden Objektoberfläche wird trotz fehlender Kohärenz der einzelnen die Oberfläche treffenden Lichtanteile eine erhöhte Bildqualität erreicht. In dem erzeugten Interferenzbild sind sowohl in Bildmitte als auch an den Bildrändern die gewünschten Verformungen gut zu erkennen.

Die Lichtbündel der Laserdioden können so stark überlappen, dass mehr als die Hälfte der Fläche des Leuchtflecks Licht von zwei Laserdioden erhält. Außerdem können mehrere Bereiche vorhanden sein, die von dem Licht von mehr als zwei Laserdioden getroffen werden. Die Ausrichtung wird zweckmäßigerweise in den meisten Fällen auf gleichmäßige Helligkeitsverteilung ausgerichtet. Dabei ist es auch möglich, nahezu die gesamte Fläche des Leuchtflecks von mehr als zwei Dioden und auch von unterschiedlich vielen Dioden beleuchten zu lassen.

Es ist möglich, die Laserdioden der gesamten Gruppe gleichzeitig, vorzugsweise im Dauerbetrieb, leuchten zu las-

sen. Bei einer abgewandelten Ausführungsform können die Laserdioden pulsierend betrieben werden. Dadurch ist eine höhere Lichtausbeute für den Moment der Bildaufnahme möglich, wodurch entweder das beobachtete Objektfeld vergrößert oder die Beleuchtungsleistung verkleinert oder die Belichtungszeit verkürzt werden kann.

Alternativ ist es möglich, die Laserdioden derart anzuordnen oder beispielsweise mit einer Shuttervorrichtung derart anzuordnen, dass das Licht der Laserdioden der Gruppe zeitlich versetzt auf die Objektoberfläche trifft. Die entstehenden Einzelinterferogramme können an dem Bildsensor überlagert und summiert (integriert) oder, je nach Hardware, einzeln aufgenommen und in einem Rechner miteinander kombiniert werden. Wie bei Dauerbeleuchtung ergibt sich insgesamt ein gleichmäßig ausgeleuchtetes Feld. Die Laserdioden können ruhend oder bewegt angeordnet sein.

Der Bildsensor ist vorzugsweise an eine Bildauswerteinrichtung angeschlossen, die anhand mehrerer aufgenommener Interferenzbilder eine Verformung der Objektoberfläche bestimmt. Dies ist insbesondere in Fällen zweckmäßig, bei denen die Struktur oder Form der unverformten Objektoberfläche ohne Interesse ist. Solche Messungen sind beispielsweise bei der Werkstück- oder Materialprüfung zweckmäßig. Z. B. können sie dazu eingesetzt werden, Fehlstellen an Reifen zu erkennen. Die zu untersuchende Reifenoberfläche wird dabei bei zwei voneinander verschiedenen Umgebungsdrücken aufgenommen. Entstehende Verformungen werden sichtbar gemacht.

Das Interferometer kann ohne direkten Interferenzstrahl arbeiten. Dies ist möglich, wenn der von dem Objekt rückgestreute Strahl in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird, von denen einer einer Phasenverschiebung unterworfen wird. Die Phasenverschiebung ist vorzugsweise steuer- oder kontrollierbar. Dazu dient vorteilhafterweise eine Einrichtung zur Phasenverschiebung, beispielsweise ein Spiegel, der von einem Piezo-Aktuator verstellt wird. Es ist möglich, als Interferometer ein Michelson-Interferometer zu verwenden. Eine besonders vorteilhafte Ausführungsform nutzt jedoch als Interferometer eine Anordnung, bei der der Objektlichtstrahl in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird, die auf unterschiedlichen Wegen zu dem Bildsensor gelangen und sich erst dort wieder treffen. Dies hat den Vorteil, dass Lichtverluste, wie sie beim Michelson-Interferometer beim Zusammenführen der Teilstrahlen im Strahlteiler auftreten, vermieden werden.

Der Bildsensor ist an eine Bildauswerteinrichtung angeschlossen, die vorzugsweise eine Recheneinheit aufweist. Die Recheneinheit, beispielsweise ein entsprechend leistungsfähiger Computer, arbeitet ein Programm ab, das die Bildverarbeitung bewerkstelligt. Dabei wird beispielsweise aus mehreren, von dem ruhenden Objekt mit gegeneinander verschobener Phasenlage aufgenommenen Bildern ein Phasenbild berechnet. Die Phasenlagen einzelner Bildpunkte sind in der Regel stochastisch verteilt und geben keinen direkten Aufschluss über das Objekt. Wird die Objektoberfläche jedoch verformt oder um einen geringen Betrag auf den Messkopf hin oder von diesem weg verschoben und wird in diesem Zustand beispielsweise durch Verknüpfung mehrerer, durch Phasenverschiebung veränderter Interferenzen untereinander ein Phasenbild erhalten, kann aus beiden erhaltenen Phasenbildern ein Phasendifferenzbild bestimmt werden. Das Phasendifferenzbild gibt Aufschluss über lokale Verschiebungen oder Verformungen und kann zur Anzeige gebracht werden. Dazu wird dem jeweiligen Phasendifferenzwinkel des Bildpunkts ein Grauwert zugeordnet, der auf einer Wiedergabeeinrichtung an der betreffenden Stelle angezeigt wird. Beispielsweise wird einem Phasendifferenzwinkel von Null der Anzeigewert schwarz und dem

Phasendifferenzwinkel von  $2\pi$  der Grauwert weiß zugeordnet.

Bei einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens und der zugehörigen Vorrichtung werden die Phasendifferenzwinkel, bevor sie zur Anzeige gebracht werden,  $2\pi/n$ -moduliert. Dazu werden die Differenzwinkel des Phasendifferenzbildes punktweise einer Modulo  $2\pi/n$ -Division unterworfen. Dies bedeutet, dass der Phasendifferenzwinkel durch  $2\pi/n$  dividiert wird und der verbleibende Rest den Ergebniswert bildet. Dieser Ergebniswert wird mit dem Faktor  $n$  multipliziert und ergibt den  $2\pi/n$ -modulierten Wert, der im Wertbereich von Null bis  $2\pi/n$  mit Grauwerten zwischen schwarz und weiß zur Anzeige gebracht wird. Bedarfsweise kann auch eine farbige Anzeige gewählt werden. Der Faktor  $n$  ist dabei vorzugsweise eine ganze Zahl größer 1. Dies ergibt eine Verstärkung der in dem Phasendifferenzbild vorhandenen und sichtbaren Objektverformungen und somit eine deutlichere Erkennbarkeit von Fehlstellen an dem Objekt.

Es ist alternativ möglich, die Phasendifferenz oder die  $2\pi/n$ -modulierten Werte der Phasendifferenzen mit einer Sinusfunktion zu modulieren und den erhaltenen Wert zur Anzeige zu bringen. Es ergibt sich dann ein Streifenmuster, das die Objektverformung kennzeichnet. Je höher  $n$  gewählt wird, desto höher ist die Auflösung, d. h. desto mehr Streifen entfallen auf eine bestimmte Objektverformung. Hierbei ist es zweckmäßig, wenn der Bediener den Faktor  $n$  durch geeignete Eingabemittel wählen kann. Der Faktor kann beispielsweise auch nach einer Bildaufnahme umgeschaltet werden, um ein und denselben Testlauf, d. h. die gleiche Objektverformung mit unterschiedlichen Modulationen darstellen zu können.

Das Verfahren ist für Prüfobjekte mit diffus streuender Oberfläche geeignet und ergibt eine bildhafte Darstellung von Phasendifferenzwinkeln. Dies gestattet dem Bediener ein leichtes Erkennen von Strukturfehlern im vermessenen Objekt. Dabei ist dieses Verfahren für beliebige Prüfobjekte bzw. Fehlergrößen anwendbar und erfordert einen geringen Rechenaufwand, so dass die Ergebnisdarstellung quasi in Echtzeit gewährleistet ist.

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird der anzuzeigende Wert so skaliert, dass der darstellbare Grauwertbereich des Bildverarbeitungssystems vollständig ausgenutzt wird. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Fehlstellen kann der einem Winkel der Größe Null entsprechende Grauwert oder Farbwert vom Benutzer interaktiv eingestellt werden.

Das  $2\pi/n$ -modulierte Phasendifferenzbild kann auch unmittelbar aus den phasenverschobenen Intensitätsbildern einer ersten Aufnahmeserie bei einem ersten Objektzustand und einer zweiten Serie phasenverschobener Aufnahmen (Intensitätsbildern) bei einem zweiten Objektzustand gewonnen werden. Die Gleichungen zur  $2\pi/n$ -Modulation werden dazu in die Gleichungen zur Erzeugung der Phasendifferenzbilder aus den Intensitätsbildern eingesetzt.

Weitere Einzelheiten vorteilhafter Ausführungsformen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen, der Zeichnung oder der Beschreibung.

In der Zeichnung sind Ausführungsbeispiele des Gegenstandes der Erfindung veranschaulicht. Es zeigen:

**Fig. 1** eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Ermittlung von Verformungen an einer Objektoberfläche, in schematisierter Darstellung,

**Fig. 2** eine Beleuchtungseinheit und eine von dieser beleuchtete Objektoberfläche zur interferometrischen Auswertung von Oberflächenverformungen, in schematisierter Prinzipdarstellung,

**Fig. 3** eine Objektoberfläche mit einem auf sie fallenden

Leuchtfleck einer Beleuchtungseinheit nach **Fig. 2**,

**Fig. 4** einen Messkopf der Vorrichtung nach **Fig. 1**, in schematisierter gesonderter Darstellung,

**Fig. 5** Grauwerte  $G$  in Abhängigkeit von Phasendifferenzwinkeln  $\Delta\pi$  bei unterschiedlichen Modulationen,

**Fig. 6** ein  $2\pi/n$ -moduliertes Bild einer Objektoberfläche,

**Fig. 7** ein  $\pi$ -moduliertes Fehlstellenbild der gleichen Objektoberfläche und

**Fig. 8** ein sinustransformiertes moduliertes Phasendifferenzbild, gebildet aus dem Fehlstellenbild nach **Fig. 3**.

In **Fig. 1** ist ein Mess-System zur Verformungsmessung an einem Prüfobjekt **1** mittels Shearing-Interferometrie dargestellt. Zur Beleuchtung des Prüfobjekts **1**, das beispielsweise ein Reifen, anderweitige Gummiteile oder ein sonstiger Gegenstand sein kann, dient eine Beleuchtungseinheit **E**, die mehrere Laserdioden **2, 3** aufweist. In **Fig. 2** ist dabei die Beleuchtung der Oberfläche des Prüfobjekts **1** näher veranschaulicht. Die schematisch dargestellte Beleuchtungseinheit **E** weist außer den Laserdioden **2, 3** weitere Laserdioden **4, 5, 6** auf, die jeweils für sich einen Lichtkegel **2a, 3a, 4a, 5a, 6a** erzeugen. Die Lichtkegel **2a, ..., 6a** fließen ineinander, so dass sie sich an der Objektoberfläche **1** mehrfach überlappen. Es entsteht insgesamt ein Leuchtfleck **7**, der weitgehend gleichmäßig ausgeleuchtet ist. Eine willkürlich herausgegriffene Stelle **S** wird von mehreren Lichtkegeln **4a, 5a, 6a** beleuchtet, die gleiche oder auch unterschiedliche Öffnungswinkel aufweisen können. Das Licht der betreffenden Laserdiode **4, 5, 6** hat im Wesentlichen die gleiche Wellenlänge, ist jedoch zueinander nicht kohärent. Gleiches gilt für das rückgestreute Licht.

Zur Beobachtung der Oberfläche des Prüfobjekts **1** dient ein Messkopf **8**, der an einer Bildauswerteeinheit **9** angeschlossen ist. Zu dieser gehören ein Computer **10** und ein Monitor **11** sowie eine Eingabeeinrichtung, beispielsweise eine Tastatur **12**.

Der Messkopf **8** enthält ein Interferometer **14**, das über ein Objektiv **15** von der Objektoberfläche rückgestreute Lichtstrahlung erhält.

In **Fig. 3** ist nochmals ein Leuchtfleck **7** veranschaulicht, der aus mehreren, sich gegenseitig stark überlappenden Teil-Leuchtflecken **7a, 7b, 7c, 7d, 7f, 7g, 7h, 7i** gebildet ist. Teile des Leuchtflecks **7** sind durch von bis zu vier unterschiedlichen Laserdioden beleuchtet. Die Strahlauffächerung kann auch größer gewählt werden, so dass jede Laserdiode nahezu den gleichen Leuchtfleck **7** ausleuchtet. Die Ausleuchtung kann dabei aus unterschiedlichen Raumwinkeln heraus vorgenommen werden, so dass sich eine gleichmäßige Verteilung gestreuten Lichts im Raum und eine gleichmäßige Fleckausleuchtung ergibt.

Das in **Fig. 4** veranschaulichte Interferometer **14** ist als Michelson-Interferometer ausgebildet. Das Objektiv **15** weist einen Öffnungswinkel  $\alpha$  auf, mit dem die Objektoberfläche aufgenommen wird. Dabei ist die Anordnung vorzugsweise so getroffen, dass der Leuchtfleck **7** das Gesichtsfeld des Objektivs **15** relativ genau ausfüllt. Bedarfsweise können jedoch auch Abweichungen vorhanden sein. Das Objektiv **15** enthält vorzugsweise eine Blende und ein nachgeordnetes Linsensystem **17**, um aus dem von der Objektoberfläche rückgestreuten Licht ein Lichtbündel auszubilden. Dieses wird einem Strahlteiler **18** zugeleitet, der im Strahlengang des Linsensystems **17** angeordnet ist. Der Strahlteiler **18** teilt den ankommenden Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen auf, die nahezu rechtwinklig auf Spiegel **19, 20** treffen. Diese sind so angeordnet, dass sie den jeweiligen Teillichtstrahl im Wesentlichen in sich selbst zurückreflektieren, wobei eine gewisse Verkippung zulässig oder zur Erzeugung von Shearing-Abbildungen erforderlich ist.

Der Spiegel **19** ist ortsfest gelagert, während der Spiegel

20 durch eine, beispielsweise aus Fig. 1 ersichtliche Piezoantriebseinrichtung in und gegen Strahlrichtung verstellbar ist. Der Piezoaktuator ist dabei von dem Computer 10 gesteuert und dazu eingerichtet, den Spiegel, bezogen auf die Lichtwellenlänge, beispielsweise in  $\lambda/4$ -Schritten zu verstellen.

Der Strahlteiler 18 führt die von den Spiegeln 19, 20 reflektierten Teilstrahlen wieder zusammen und über ein Abbildungsobjektiv 23 einer Kamera 24 zu. Die Kamera 24 enthält als Bildsensor eine CCD-Matrix 25 und die entsprechenden Elektronikbausteine zur Ansteuerung derselben. Die Kamera 24 ist mit dem Computer 10 verbunden.

Das insoweit beschriebene Mess-System arbeitet wie folgt:

Zur Bestimmung von Objektfehlstellen wird das Objekt 1 vor dem Messkopf 8 platziert und mit den Laserdioden 2, 3, 4, 5, 6 beleuchtet. Die Laserdioden 2, 3, 4, 5, 6 können dabei im Dauerbetrieb betrieben werden, d. h. gleichzeitig dauernd leuchten. Auf dem Objekt 1 wird dadurch der Leuchtfleck 7 erzeugt, der auf den auf Fehlstellen zu untersuchenden Bereich fällt. Ohne dass das Objekt 1 in irgendeiner Weise merklich bewegt würde, werden nun mehrere Bilder von der Objektoberfläche aufgenommen. Dazu wird bei gegebener Positionierung der Spiegel 19, 20 zunächst ein erstes Bild aufgenommen und abgespeichert. Das von dem Bildsensor 25 erfasste Bild ist ein Interferenzmuster der Objektoberfläche, das stochastisch verteilte helle, dunkle und graue Bereiche, sogenannte "Speckles" enthält. Ist das Bild aufgenommen, steuert der Rechner der Spiegel 20 so an, dass er um einen bekannten Betrag verschoben wird. Es ergibt sich eine definierte Phasenverschiebung zwischen den beiden Teilstrahlen der Spiegel 19 und 20. Das Speckle-Bild ändert sich dabei, indem die einzelnen Speckles geänderte Helligkeit annehmen. Die Speckles bleiben selbst jedoch am gleichen Ort.

Ist das Bild aufgenommen, wird eine weitere Verstellung des Spiegels 20 aufgenommen, um ein drittes Bild aufzunehmen. Ist das dritte Bild aufgenommen, wird nach einer nochmaligen Verstellung des Spiegels 20 um einen bekannten Phasenbetrag ein viertes Bild aufgenommen. Aus den vier unterschiedlichen Speckle-Bildern berechnet der Computer 10 die für jeden Speckle oder jeden Pixel gültigen Phasenwinkel.

Ist auf diese Weise das erste Phasendifferenzbild erzeugt, wird das zu prüfende Objekt 1 beispielsweise mit einer Prüfkraft beaufschlagt. Dies kann im Falle von Reifen dadurch geschehen, dass der Umgebungsdruck geändert wird. Es ergeben sich dadurch an der Oberfläche des Objekts 1 charakteristische Verformungen, die insbesondere an Fehlstellen größer sind als die Verformung der Umgebung. Ist das Objekt 1 verformt, werden wiederum mehrere, durch Verstellung des Spiegels 20 phasenverschobene Speckle-Bilder aufgenommen, aus denen dann die geänderten Phasenwinkel pixelweise berechnet werden. Es ergibt sich ein zweites Phasenwinkelbild. Zur Bestimmung der Oberflächenverformung wird aus beiden erhaltenen Phasenbildern nun ein Phasendifferenzbild erzeugt. Dies erfolgt bildpunkt- oder pixelweise. Es wird die Phasenwindeldifferenz zwischen verformtem und unverformtem Zustand für jeden Bildpunkt bestimmt. Ist auf diese Weise das Phasendifferenzbild erhalten, kann es auf dem Monitor 11 zur Anzeige gebracht werden. Ein nach diesem Verfahren erzeugtes Fehlstellenbild ist in Fig. 6 wiedergegeben. Während eine schwarz erscheinende Fehlstelle noch relativ gut sichtbar ist, scheint die links daneben vorhandene Fehlstelle relativ schwach auf.

Eine Betonung der Fehlstellen wird erhalten, wenn der Computer 10 die Phasendifferenzbilder nachbearbeitet. In der Nachbearbeitung wird dem Phasendifferenzbildern

$\Delta\varphi(x, y)$  ein  $2\pi/n$ -moduliertes Phasendifferenzbild erzeugt. Dazu wird für jeden Bildpunkt folgende Gleichung abgearbeitet:

$$\varphi_{d,n}(x,y) = n \cdot (\Delta\varphi(x,y)) \bmod(2\pi/n) \cdot s \text{ oder:}$$

$$\varphi_{d,n}(x,y) = n \cdot (\Delta\varphi_2(x,y)) - \bmod(2\pi/n) \cdot s$$

mit

$\Delta\varphi(x,y)$ : Phasendifferenzwinkel am Punkt  $(x,y)$

$\varphi_1(x,y)$ : Phasendifferenzwinkel am Punkt  $(x,y)$  im Zustand 1

$\varphi_2(x,y)$ : Phasendifferenzwinkel am Punkt  $(x,y)$  im Zustand 2

$(\varphi_{diff}(x,y))$ : Phasendifferenzwinkel mit  $2\pi/n$ -Modulation am Punkt  $(x,y)$

$n$ : ganze Zahl größer gleich 1

$s$ : Umrechnungsfaktor von Phasendifferenzwinkel in Grauwert

MOD: Modulo-Operator.

Diese Operation ist in Fig. 5 veranschaulicht. Das Diagramm veranschaulicht die Zuordnung eines Grauwerts  $G$  zu einem Phasendifferenzwinkel  $\Delta\varphi$  an einen ausgewählten Punkt  $x,y$ . Ohne Nachbearbeitung werden Phasendifferenzwinkelwerte zwischen Null und  $2\pi$  Grauwerten entsprechend einer Geraden 30 zugeordnet. Bei einer Nachbearbeitung mit beispielsweise  $n = 4$  werden die Phasendifferenzwinkel  $\Delta\varphi$  auf die entsprechend steileren Geraden 31, 32, 33, 34 abgebildet. Dies erfolgt, indem die vorhandenen Differenzwinkel  $\Delta\varphi$  jeweils in den von der Geraden 31 eingenommenen Bereich projiziert werden. Dazu wird der vorhandene Phasendifferenzwinkel  $\Delta\varphi$ , beispielsweise  $3\pi/4$  durch  $2\pi/4$  geteilt. Der verbleibende Divisionswert beträgt  $\pi/4$  und stellt das Ergebnis der Modulo  $2\pi/4$ -Division dar. Der Divisionsrest wird nun mit  $n$  multipliziert, wobei  $n$  der Faktor ist, der den gegenüber der Geraden 30 vergrößerten Anstieg der Geraden 31 kennzeichnet. Bei dieser Darstellung wird dem Differenzwinkel  $\pi/4$  der gleiche Grauwert zugeordnet wie den Differenzwinkeln  $3\pi/4$ ,  $1\frac{1}{4}\pi$  und  $1\frac{3}{4}\pi$ . Das entstehende Monitorbild ist in Fig. 7 veranschaulicht. Die beiden Fehlstellen sind als heller bzw. dunkler Fleck deutlich hervorgehoben zu erkennen. Dies ermöglicht eine sichere und präzise Darstellung von Fehlstellen und vermeidet die Gefahr, dass bei der Inspektion des Objekts strukturelle Fehler wegen verwaschener Darstellung übersehen werden.

Außerdem ist es möglich, die erhaltenen Phasendifferenzwinkel  $\Delta\varphi$  oder die  $2\pi/n$ -modulierten Differenzwinkel  $\Delta\varphi$  als Argument in eine Sinusfunktion einzusetzen, um eine Sinustransformation durchzuführen. Dies muss wiederum punktweise geschehen. Die Transformation lautet:

$$\varphi(x,y) \rightarrow \sin(\varphi(x,y)).$$

Die Amplitude der Interferenzlinien ist normiert, d. h. die Amplitude der Sinusmodulation ist im Bild unabhängig vom Ort überall konstant. Es ergibt sich ein gut lesbares Bild, insbesondere Fehlstellenbild (Fig. 8). Die Anzahl der Interferenzlinien wird mit größer werdendem  $n$  ebenfalls größer.

Die Bildverarbeitungseinrichtung 9, d. h. das auf dem Computer 10 laufende Programm kann so beschaffen sein, dass die Wahl der Modulation beispielsweise durch Eingabe des Faktors  $n$  möglich ist. Außerdem kann das Programm so beschaffen sein, dass zwischen Wiedergabe der Phasendifferenzwinkel (mit und ohne Modulation) und der Wiedergabe eines sinustransformierten Bilds umgeschaltet werden kann.

In Fig. 1 ist ein Mess-Kopf 8 mit Michelson-Interferometer zugrundegelegt. Abweichend davon kann ein Messkopf 8 mit einem Interferometer 14 zur Anwendung kommen, bei dem ein Lichtstrahl in Teilstrahlen A, B aufgeteilt wird, die erst an der CCD-Matrix 25 zu einem Interferenzbild verei-

nigt werden. Dies hat den Vorteil einer deutlich lichtstärkeren Abbildung. Das Interferometer 14 weist ein Aufnahmeobjektiv 41 auf, das einen Lichtstrahl auf einen Strahlteiler 42 leitet. Hier entstehen die Teilstrahlen A und B. Der Teilstrahl A wird zu einem Kippspiegel 43 weitergeleitet und etwa im rechten Winkel abgelenkt. Der Teilstrahl B trifft zunächst auf einen mit einem Antrieb, beispielsweise einem Piezoantrieb, verschiebbar gelagerten Spiegel 44, um im spitzen Winkel reflektiert zu werden. Er trifft dann auf einen weiteren, etwa parallel zu dem Spiegel 44 angeordneten Spiegel 45, so dass der Teilstrahl B, ausgehend von dem Spiegel 45, im spitzen Winkel zu dem Teil des Teilstrahls A verläuft, der von dem Spiegel 43 ausgeht. Beide Teilstrahlen werden durch ein Abbildungsobjektiv 46 geleitet und treffen auf einen zweiachsigen Spiegel 47. Der zweiachsige, als Winkelspiegel ausgebildete Spiegel 47 lässt nun beide Teilstrahlen A, B auf ein und dieselbe Stelle 48 des Bildsensors 25 fallen. Das hier durch Interferenz der Teilstrahlen A und B entstehende Muster wird von dem Bildsensor 25 erfasst und an den Computer 10 weitergeleitet. Der Computer 10 steuert außerdem den Antrieb des verschiebbaren Spiegels 44, um eine Phasenmodulation herbeizuführen, was der Aufnahme der phasenverschobenen Bilder dient.

Ein Mess-System dient insbesondere der Erfassung von Fehlstellen an Prüfobjekten. Das Messobjekt 1 wird dazu aus einer Beleuchtungseinheit E, die mehrere Laserdioden 2, 3, 4, 5, 6 enthält, gleichmäßig ausgeleuchtet. Die Strahlkegel der einzelnen Laser überlappen sich stark, was eine homogene Beleuchtung auch bei großen Aufnahmewinkeln und sich ändernden Abbildungsverhältnissen durch unterschiedliche Objektgrößen und Abstände erbringt. Das Messobjekt 1 wird interferometrisch beobachtet. Aus einzelnen Bildern werden Phasendifferenzbilder ermittelt. Diese werden  $2\pi/n$ -moduliert, wodurch insbesondere im Bereich von Fehlstellen Phasensprünge entstehen, die besonders gute Kontraste ergeben.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Ermittlung von Verformungen an einer Objektoberfläche, insbesondere einer diffus streuenden Objektoberfläche, mit einem Messkopf (8), der ein Interferometer (14) zur Erzeugung eines Interferenzbildes aufweist, mit einem elektronischen Bildsensor (25), der in dem Strahlengang des Interferometers (14) angeordnet ist, so dass das Interferenzbild von dem Bildsensor (25) erfasst wird, und mit einer Beleuchtungseinheit (E), die eine Gruppe von Laserdioden (2, 3, 4, 5, 6) aufweist, die so angeordnet sind, dass sie auf dem Prüfobjekt einen gemeinsamen Leuchtfleck (7) erzeugen.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Laserdioden (2, 3, 4, 5, 6) der Gruppe einen einander gegenseitig durchdringenden Strahlkegel (2a, 3a, 4a, 5a, 6a) aufweisen.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Leuchtfleck (7) wenigstens einen, vorzugsweise mehrere Bereiche aufweist, die von dem Licht von mehr als zwei Laserdioden beleuchtet werden.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Leuchtfleck (7) eine gleichmäßige Helligkeitsverteilung aufweist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserdioden (2, 3, 4, 5, 6) der Gruppe gleichzeitig, vorzugsweise im Dauerbetrieb leuchten.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

dass die Laserdioden (2, 3, 4, 5, 6) der Gruppe pulsierend betrieben werden.

7. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserdioden (2, 3, 4, 5, 6) derart angesteuert oder angeordnet sind, dass das Licht der Laserdioden (2, 3, 4, 5, 6) der Gruppe zeitlich versetzt auf die Objektoberfläche auftrifft.

8. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Bildsensor (25) an eine Bildauswerteeinrichtung (9) angeschlossen ist, die anhand mehrerer aufgenommener Interferenzbilder eine Verformung der Objektoberfläche bestimmt.

9. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Interferometer (14) eine Einrichtung zur Phasenverschiebung zweier Teilstrahlen gegeneinander aufweist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Bildauswerteeinrichtung (9) eine Recheneinheit (10) aufweist, die dazu eingerichtet ist, aus mehreren von dem Objekt in unterschiedlicher Phasenlage aufgenommenen Bildern ein Phasenbild zu berechnen.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Recheneinheit (10) dazu eingerichtet ist, aus wenigstens zwei unterschiedlichen, vorzugsweise in unterschiedlichen Objektzuständen gewonnenen Phasenbildern ein Phasendifferenzbild  $\Delta\phi(x,y)$  zu bestimmen, indem der einem ersten Objektzustand zugeordnete Phasenwinkel  $\phi_1(x,y)$  eines Bildpunktes (x,y) von dem einem zweiten Objektzustand zugeordneten Phasenwinkel  $\phi_2(x,y)$  des gleichen Bildpunktes (x,y) subtrahiert wird.

12. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Recheneinheit (10) die Phasendifferenzwerte punktweise modulo  $2\pi/n$  dividiert und das Ergebnis mit einem Faktor n multipliziert sowie den erhaltenen Wert bereithält.

13. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass n eine ganze Zahl ist, die größer oder gleich 1 ist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Recheneinheit (10) die Phasendifferenzen  $\Delta\phi(x,y)$  oder die  $2\pi/n$ -modulierten Werte bildpunktweise als Argument in eine Sinusfunktion einsetzt und den erhaltenen Wert bereithält.

15. Vorrichtung nach Anspruch 12, 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Recheneinheit (10) mit einer Anzeigeeinrichtung (11) verbunden ist und dass der bereitgehaltene Wert durch die Anzeigeeinrichtung (11) als dargestellt wird.

16. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Interferometer (14) nach Art eines Michelson-Interferometers aufgebaut ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Interferometer (14) einen Strahlteiler (18) aufweist, der das von der Objektoberfläche kommende Licht in zwei Teilstrahlen aufteilt, die bis zu dem Bildsensor (25) unterschiedliche Wege durchlaufen und sich auf dem Bildsensor (25) zur Erzeugung eines Interferenzmusters treffen.

18. Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an einer Objektoberfläche, insbesondere einer diffus streuenden Objektoberfläche, mittels interferometrischer Oberflächenbeobachtung oder -Abbildung.

bei dem die Objektoberfläche mit einer Gruppe von Laserdioden beleuchtet wird, deren Licht auf einen gemeinsamen Leuchtfleck auf dem Prüfobjekt geleitet wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Leuchtfleck wenigstens einen, vorzugsweise mehrere Bereiche aufweist, die von dem Licht von mehr als zwei Laserdioden beleuchtet werden.

5

20. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserdioden der Gruppe gleichzeitig, vorzugsweise im Dauerbetrieb leuchten.

21. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserdioden der Gruppe pulsierend betrieben werden.

10

22. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass aus mehreren gegeneinander phasenverschoben aufgenommenen Bildern der Objektoberfläche in ein und demselben Zustand Phasenbilder  $\varphi(x,y)$  gewonnen werden und dass wenigstens aus zwei unterschiedlichen, vorzugsweise in unterschiedlichen Objektzuständen gewonnenen Phasenbildern ( $\varphi_1(x,y)$ ,  $\varphi_2(x,y)$ ) ein Phasendifferenzbild  $\Delta\varphi(x,y)$  bestimmt wird, indem der einem ersten Objektzustand zugeordnete Phasenwinkel  $\Delta\varphi_1(x,y)$  eines Bildpunktes  $(x,y)$  von dem einem zweiten Objektzustand zugeordneten Phasenwinkel  $\Delta\varphi_2(x,y)$  des gleichen Bildpunktes  $(x,y)$  subtrahiert wird.

15

20

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasendifferenzwerte punktweise durch  $2\pi/n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 1$ ) dividiert und der verbleibende Rest mit einem Faktor  $n$  multipliziert wird und dass der erhaltene Wert durch als  $2\pi/n$ -modulierter Wert bereitgestellt wird.

25

30

24. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass aus phasenversetzt aufgenommenen Intensitätsbildern unmittelbar ein  $2\pi/n$ -moduliertes Phasendifferenzbild gewonnen wird.

25. Verfahren nach Anspruch 22, 23 oder 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasendifferenzen  $\Delta\varphi(x,y)$  oder die  $2\pi/n$ -modulierten Werte bildpunktweise als Argument in eine Sinusfunktion einsetzt und den erhaltenen Wert bereitgestellt werden.

35

26. Verfahren nach Anspruch 22, 23, 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, dass der bereitgehaltene Wert durch eine Anzeigeeinrichtung (11) dargestellt wird.

40

---

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

---

45

50

55

60

65

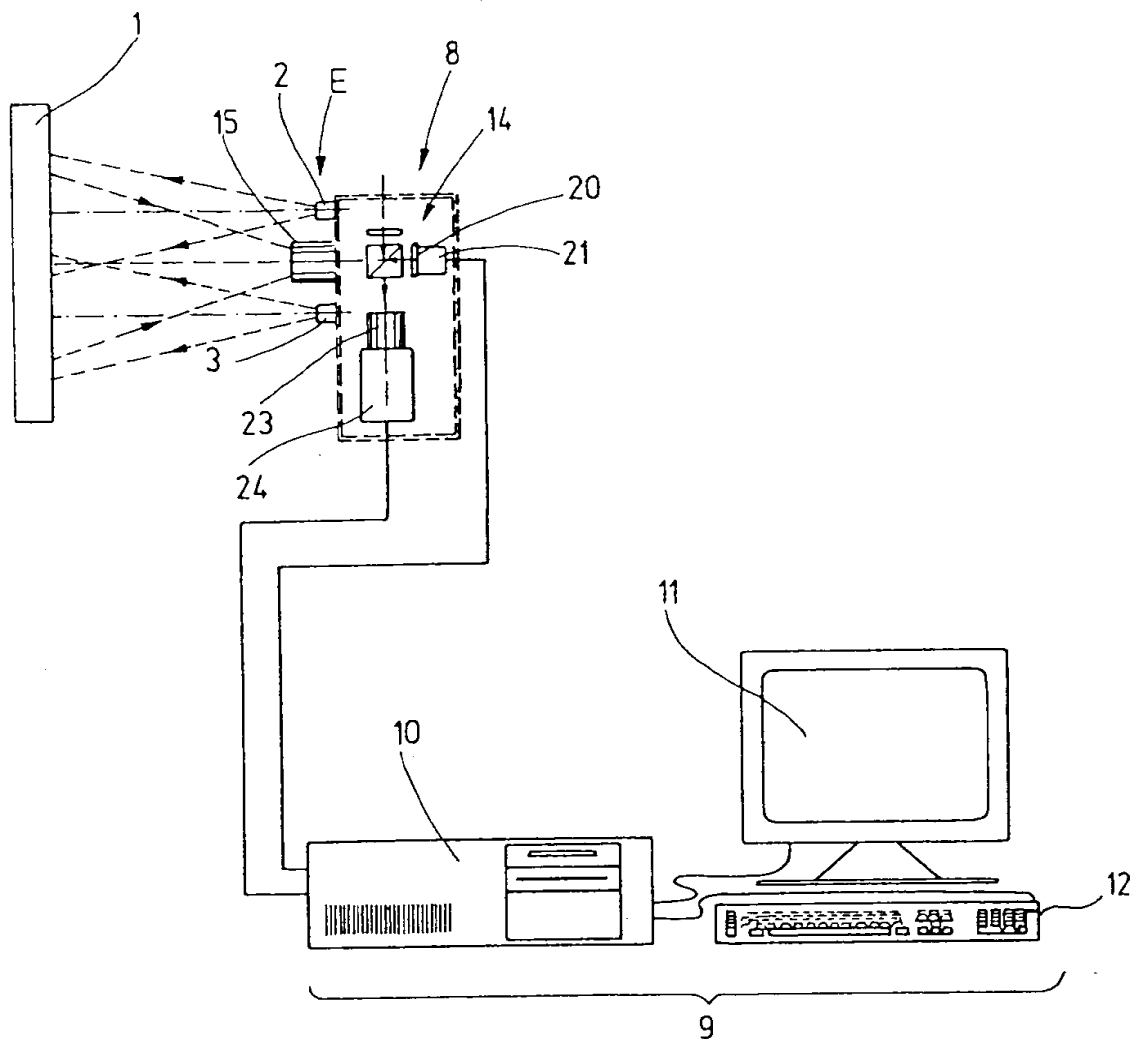


Fig. 1

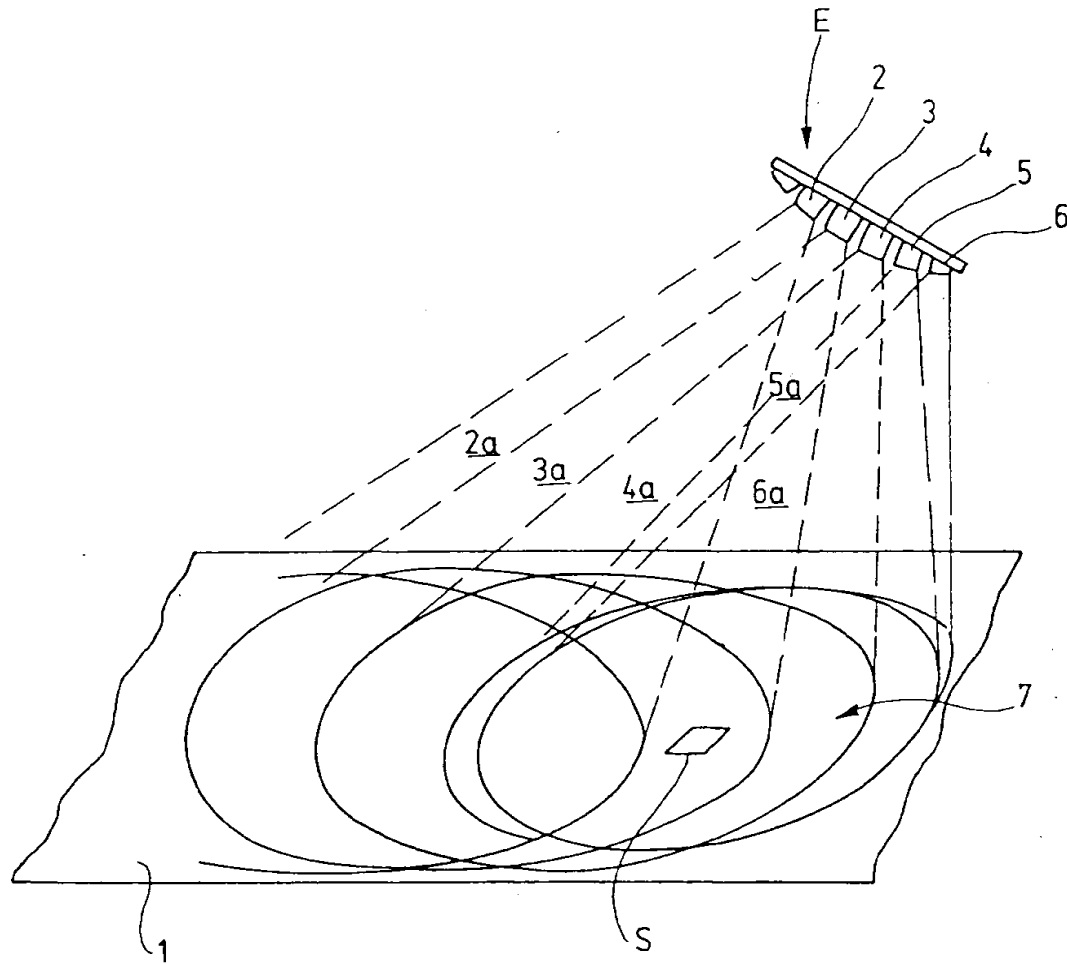


Fig. 2



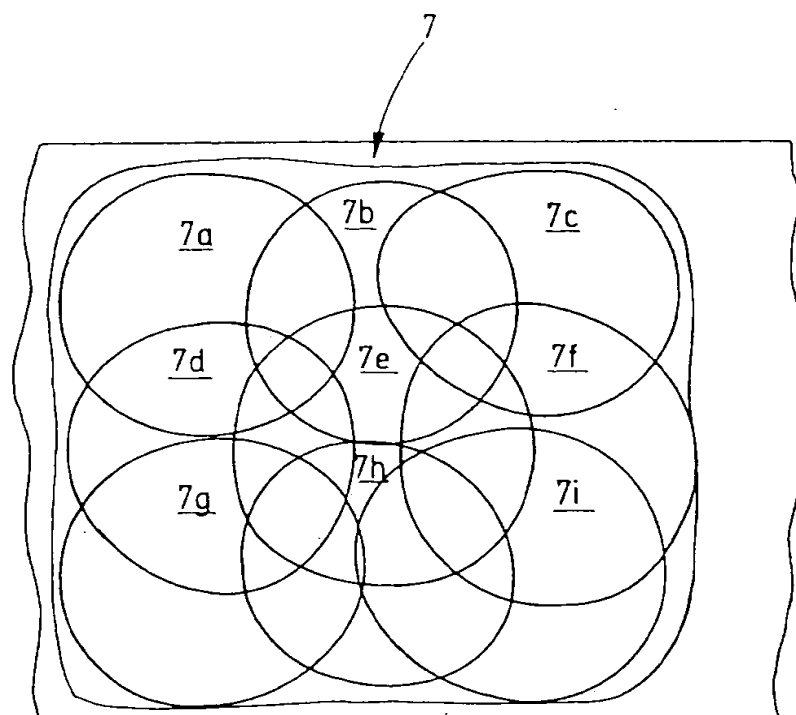


Fig. 3

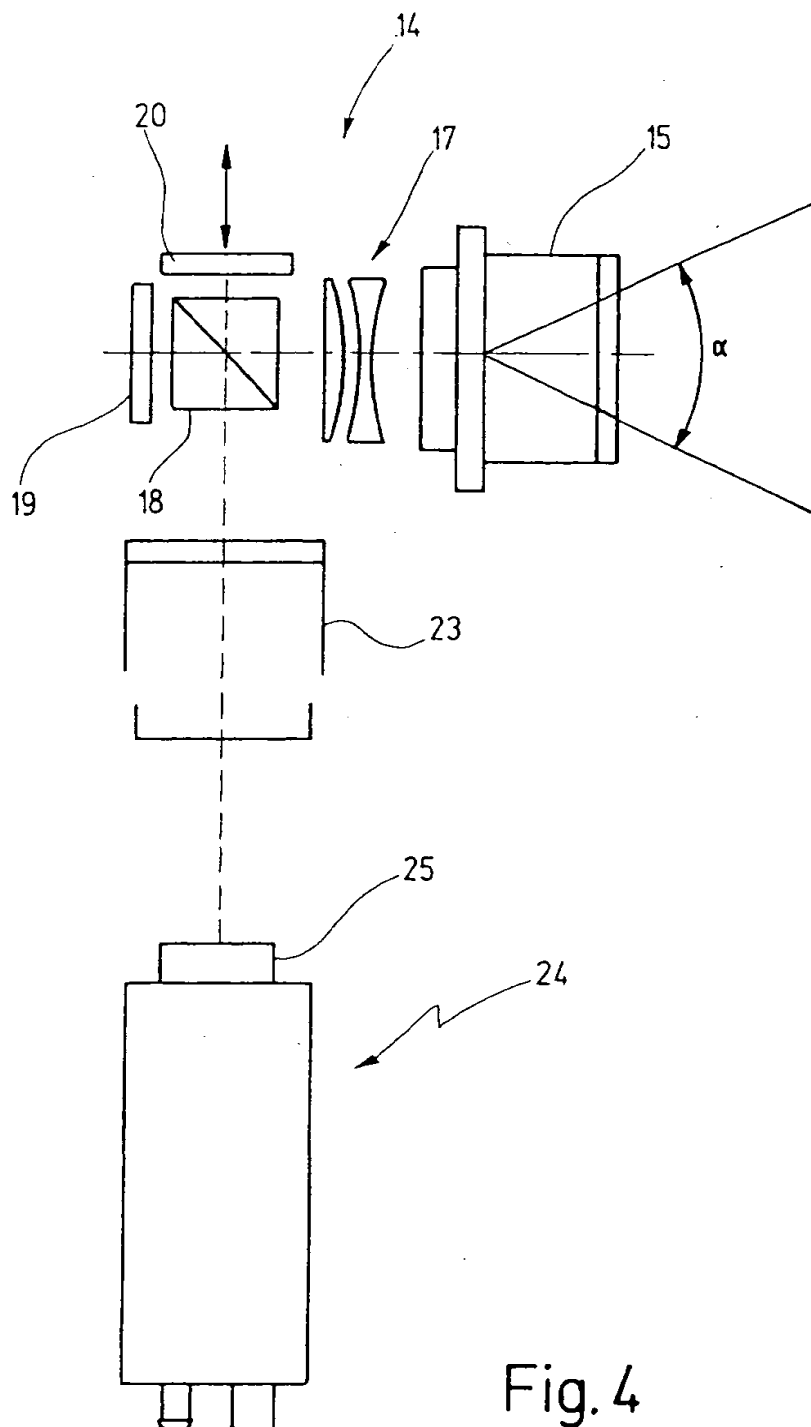


Fig. 4

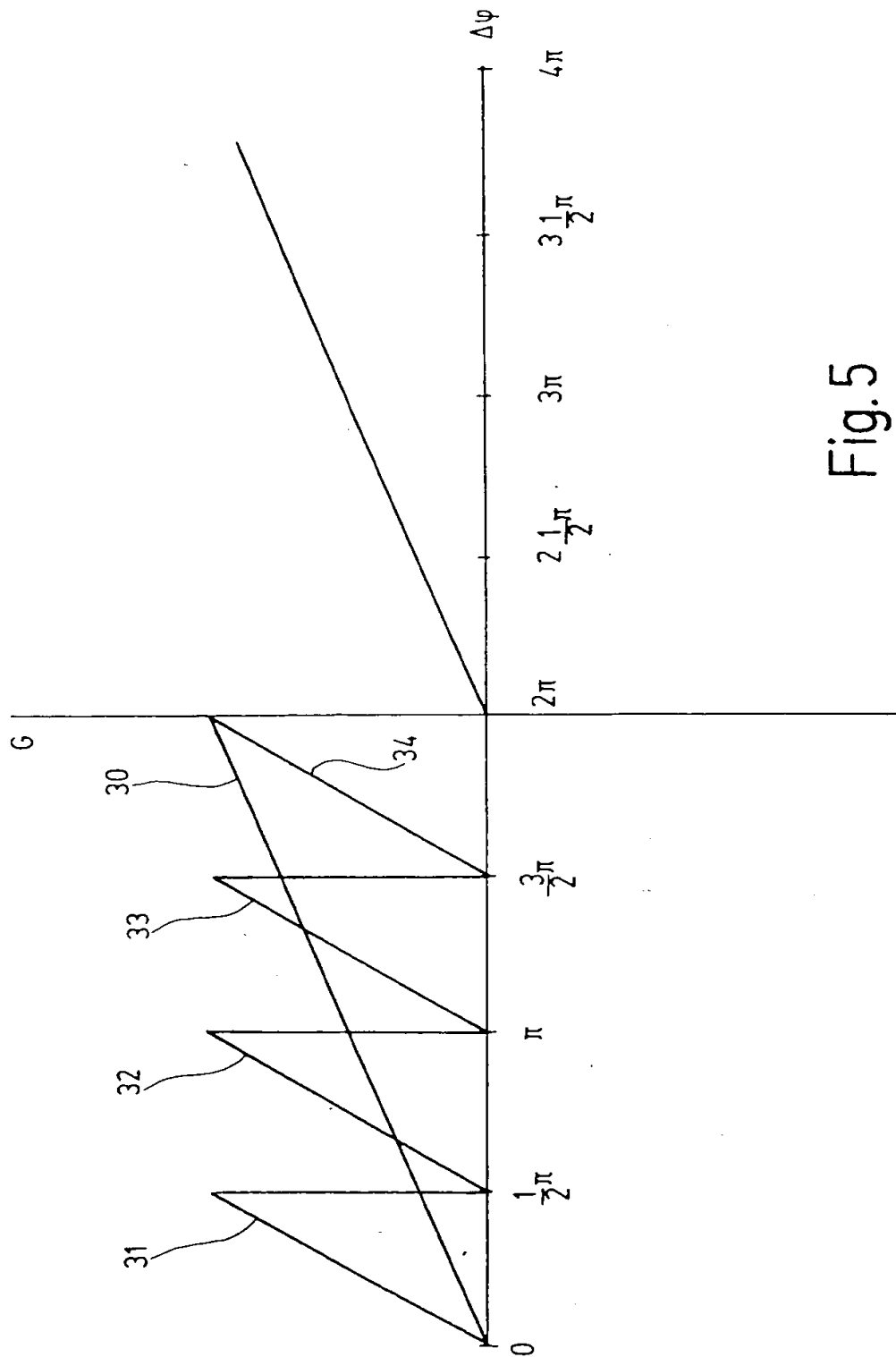


Fig. 5

Fig. 6

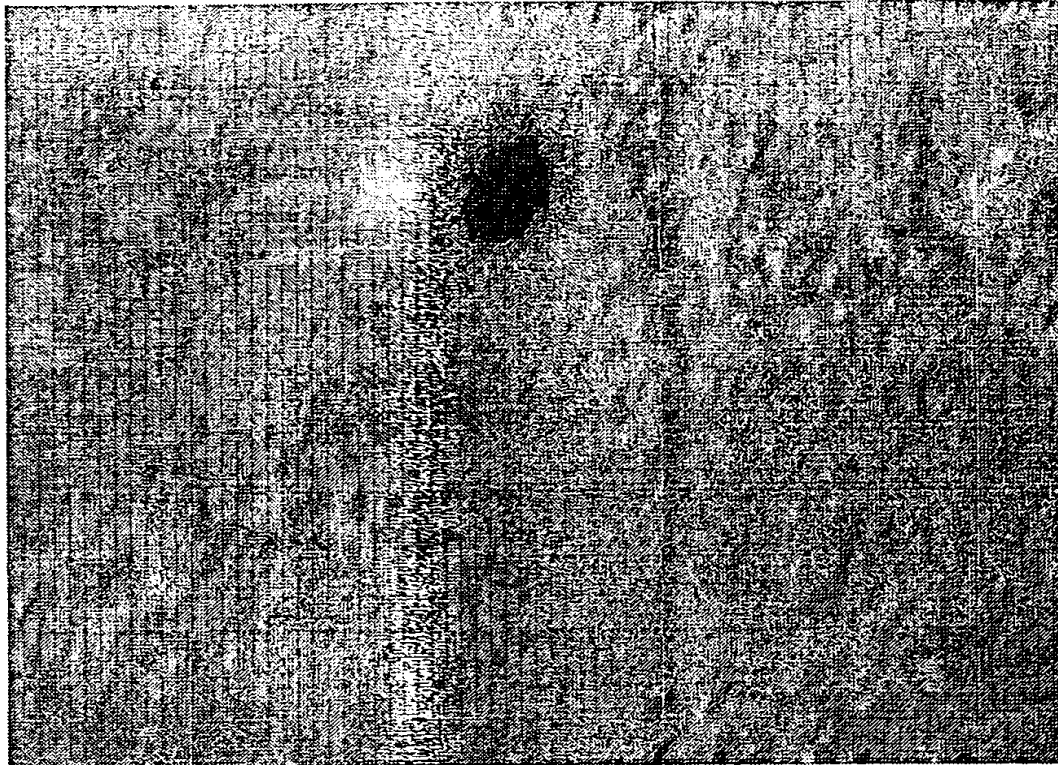


Fig. 7

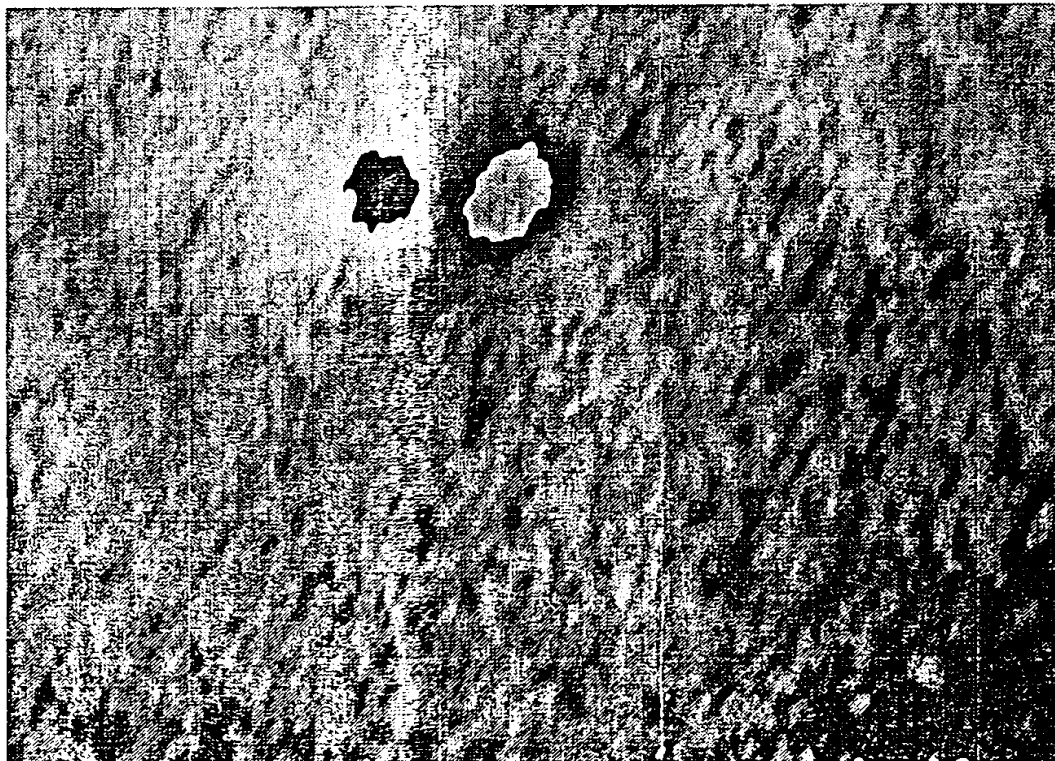
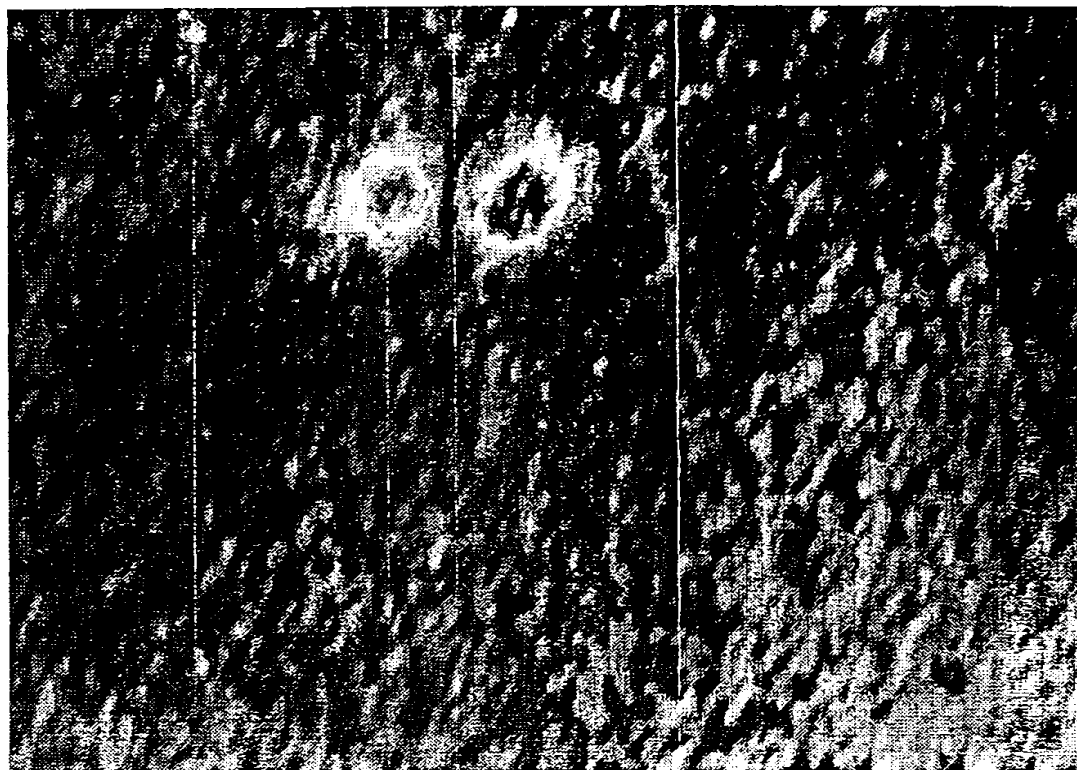


Fig. 8



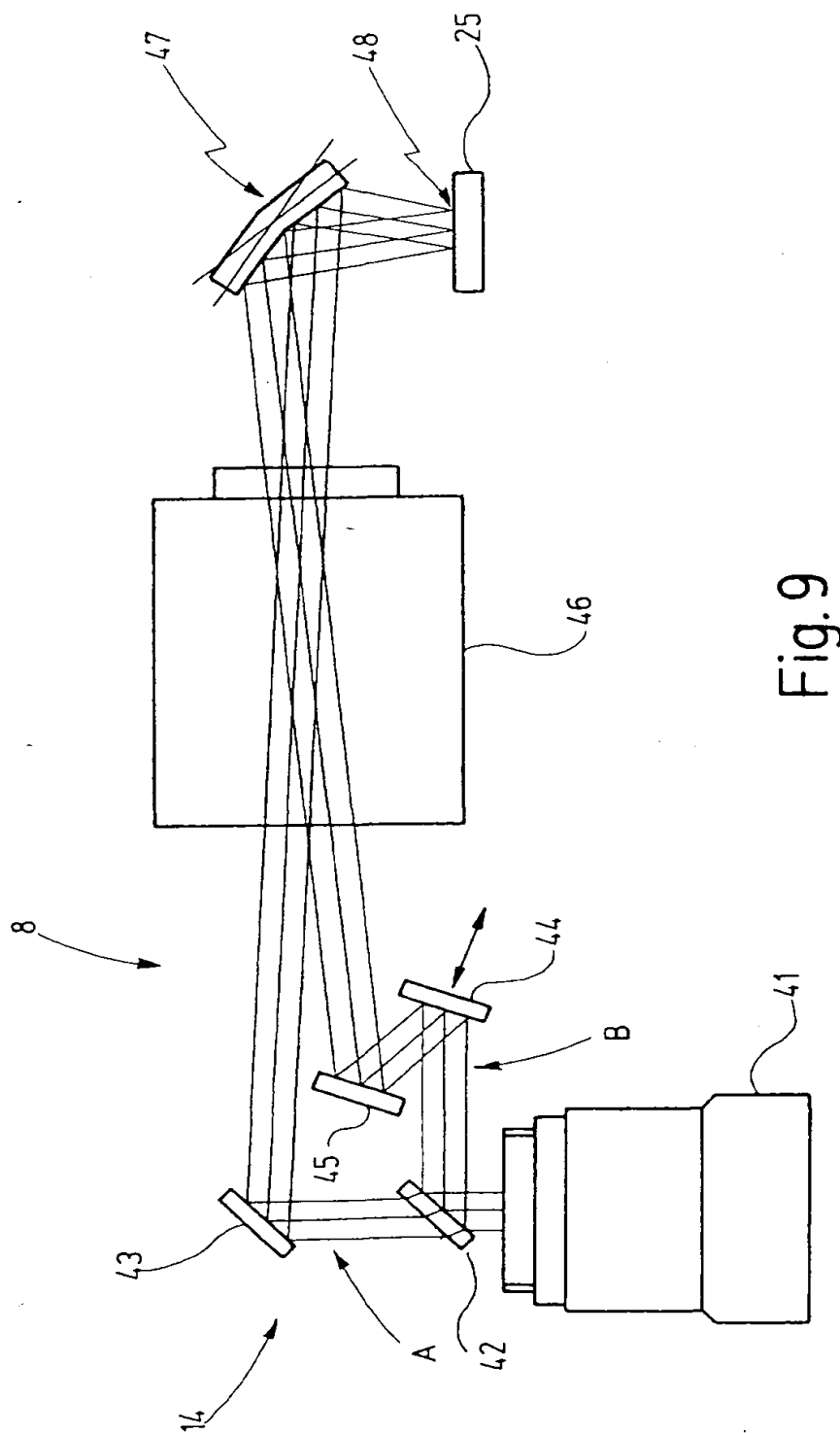


Fig. 9